

### **Werkstoff auf der Basis einer Aluminium-Legierung, Verfahren zu seiner Herstellung sowie Verwendung hierfür**

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung eines Werkstoffs auf der Basis einer Aluminium-Legierung nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1, einen mit diesem Verfahren erhältlichen Werkstoff sowie eine Verwendung dieses Werkstoffs.

In den letzten Jahren ist bei Verbrennungsmotoren für Kraftfahrzeuge verstärkt ein Trend hin zu noch leichteren und kompakteren Aggregaten mit gesteigerten spezifischen Leistungen zu beobachten. Dies führt unter anderem auch zu einer immer stärkeren Belastung der hierfür eingesetzten Kolben. Diesem Trend kann sowohl durch geänderte Konstruktionen, aber auch vor allem durch die Entwicklung neuer geeigneter Werkstoffe Rechnung getragen werden. Im Vordergrund steht dabei der Wunsch nach hoch warmfesten und spezifisch leichten Materialien.

Bis jetzt werden Kolben üblicherweise aus Aluminium-Silizium-Gusslegierungen hergestellt. Wegen der guten Gießeigenschaften lassen sich Kolben auf der Basis von Aluminium-Silizium-Legierungen relativ preisgünstig und einfach im Kokillengussverfahren herstellen.

Diese Werkstoffe werden typischerweise mit Siliziumgehalten zwischen 12 und 18 Gew.-%, in Einzelfällen auch bis zu 24 Gew.-%, sowie mit Beimengungen von Magnesium zwischen 1 bis 1,5 Gew.-%, Kupfer zwischen 1 und 3 Gew.-% und häufig auch Nickel zwischen 1 bis 3 Gew.-% legiert. Um die Warmfestigkeit einer solchen Legierung zu verbessern, wird z. B. gemäß der US 6 419 769 A1 empfohlen, den Kupfergehalt zwischen 5,6 und 8,0 Gew.-% einzustellen. Nach der FR 2 690 957 A1

wird die Festigkeit einer derartigen Legierung durch Zugabe der Elemente Titan, Zirkonium und Vanadium zusätzlich gesteigert. Allerdings wird durch das Zulegieren dieser festigkeitssteigernden Elemente die Dichte des Werkstoffs erhöht.

Eine warmfeste Legierung mit reduziertem spezifischem Gewicht wird in der Patentschrift DE 747 355 als für Kolben besonders vorteilhaft beschrieben. Dieser Werkstoff zeichnet sich durch einen Magnesiumgehalt zwischen 4 und 12 Gew.-% und einen Siliziumgehalt zwischen 0,5 und 5 Gew.-% aus, wobei der Siliziumgehalt stets geringer als die Hälfte des Magnesiumgehalts sein soll. Ferner sind zwischen 0,2 und 5 Gew.-% Kupfer und/oder Nickel zulegiert. Dieser Werkstoff soll sich auch bei Verzicht auf die Zulegierung festigkeitssteigernder Komponenten durch eine verbesserte Warmfestigkeit auszeichnen.

In der DE 38 42 812 A1 wird ein Gussleichtwerkstoff auf Basis einer Aluminiumlegierung mit 5 bis 25 Masse-% Magnesiumsilizid beschrieben. Neben Magnesiumsilizid wird außerdem als vorteilhaft sowohl ein Überschuß von Silizium (bis 12 Masse%) als auch von Magnesium (bis 15 Masse%) betrachtet. Ferner können bis zu 5 Masse-% Kupfer, Nickel, Mangan und Kobalt zulegiert sein. In Unteranspruch 5 wird zusätzlich die Liquidustemperatur von  $<700^{\circ}\text{C}$  im Dreistoffsystem Al-Si-Mg als begrenzendes Limit genannt. Vorteile bzw. Nachteile bei den mechanischen Eigenschaften, welche sich aus einem Überschuß von Magnesium bzw. Siliziums ergeben könnten werden nicht explizit erwähnt.

Diese bekannten Werkstoffe sind ausnahmslos Gusswerkstoffe. Es besteht allerdings auch ein Bedarf an Werkstoffen mit noch geringerer Dichte und noch höherer Festigkeit, die durch die ausschließliche Verwendung eines Gießverfahrens bisher nicht herstellbar sind.

Demgemäß ist Gegenstand der vorliegenden Erfindung ein Verfahren zur Herstellung eines Werkstoffs, wobei eine Aluminium-Basislegierung mit einem Gehalt zwischen

5,5 und 13,0 Masse-% Silizium, zusätzlich einem Gehalt an Magnesium gemäß der Formel  $Mg \text{ [Masse-\%]} = 1,73 \times Si \text{ [Masse-\%]} + m$

mit  $m = 1,5$  bis 6,0 Masse-% Magnesium

sowie Kupfer mit einem Gehalt zwischen 1,0 und 4,0 Gew.% (Rest Aluminium) - erschmolzen, gegossen oder durch Sprühkompaktieren vorverdichtet und die Basislegierung anschließend zumindest einmal warmumgeformt wird, sowie nachfolgend einer Wärmebehandlung bestehend aus Lösungsglühen, Abschrecken und Warmauslagern unterzogen wird.

Das Magnesium wird also in Abhängigkeit vom jeweils gewünschten Siliziumgehalt gemäß der oben genannten Formel zugesetzt. Dabei reagiert ein Teil des Magnesiums ( $1,73 \times Si$ -Gehalt) direkt mit Silizium zu Magnesiumsilizid, die restlichen 1,5 bis 6,0 Masse-% Magnesium lösen sich im Aluminiummischkristall und bewirken nach geeigneter Wärmebehandlung zusammen mit Kupfer eine Festigkeitssteigerung des Werkstoffs. Der Werkstoff kann die in Aluminiumlegierungen üblichen Verunreinigungen enthalten. Zusätzlich könnte zum Zwecke einer weiteren Festigkeitssteigerung das Zulegieren weiterer Legierungselemente sinnvoll erscheinen. Bekannt ist z.B. die festigkeitssteigernde Wirkung kleiner Zugabemengen (0,05 bis 0,2% von Titan, Zirkon oder Vanadin (FR 2 690 957 A1), ebenso bekannt ist die Wirkung von 0,1 bis 0,5% Silber welches bei AlCu-Legierungen sich positiv auf die Warmfestigkeitseigenschaften auswirkt. Ohne Nachteile für die mechanischen Eigenschaften wirkt sich die Zugabe von kleinen Gehalten (0,2 bis 2%) weiterer, der für viele Aluminium-Kupfer-Magnesiumlegierungen zusätzlich Verwendung findender Legierungselemente z.B. Nickel, Kobalt oder Mangan oder Eisen aus. Durch die Zugabe vorgenannter Elemente, wird jedoch zumeist die Dichte des beanspruchten Leichtbauwerkstoffes erhöht.

Der nach dem erfindungsgemäßen Verfahren erhältliche Werkstoff zeichnet sich neben seiner geringen Dichte durch ausgezeichnete Festigkeitseigenschaften aus, die sich auch bei erhöhten Temperaturen gegenüber den heutigen gebräuchlichen Kolbenlegierungen als überlegen zeigen.

Vorteilhafte Weiterbildungen ergeben sich aus den Unteransprüchen.

Die Basislegierung kann mit allen bekannten Warmumformverfahren, bspw. Strangpressen, Warmwalzen oder Schmieden behandelt werden. Das Warmumformen sollte mit einem Umformgrad größer als 5-fach durchgeführt werden.

Um die Qualität des Werkstoffs nicht zu beeinträchtigen, sollte das verwendete Aluminium bzw. die Basislegierung Fremdelemente nur in einem geringen Anteil, und zwar nicht mehr als jeweils 1 Masse-% pro Fremdelement, enthalten.

Zur Erzielung maximaler Festigkeitseigenschaften wird vorteilhaft nach der Warmformgebung eine Wärmebehandlung durchgeführt. Diese kann auf an sich bekannte Weise durch Lösungsglühen, Abschrecken und Warmauslagern erfolgen.

Der erfindungsgemäße Werkstoff eignet sich zur Herstellung von Bauteilen aller Art, insbesondere von Kolben für Verbrennungsmotoren.

### **Ausführungsbeispiel 1:**

Eine Legierung A der folgenden Zusammensetzung:

8,1 Masse-% Silizium

17,2 Masse-% Magnesium

1,7 Masse-% Kupfer

0,3 Masse-% Eisen

50 ppm Beryllium

Rest Aluminium

wird hergestellt, indem die einzelnen Elemente nach den üblichen Verfahren legiert und mittels dem Verfahren des Sprühkompaktierens zu einem zylindrischen Block vergossen werden. Das resultierende Vormaterial wird auf 400 bis 500°C vorge-

wärmt und durch Strangpressen 10-fach umgeformt und anschließend gehärtet. Dazu wird eine Wärmebehandlung, umfassend Lösungsglühen bei 500°C für 2 Stunden, Abschrecken in Wasser und 10 Stunden Anlassen bei 210°C durchgeführt.

Beryllium wird zugegeben, um die Oxidationsneigung der Schmelze zu mindern. Eisen wurde als Verunreinigung analysiert.

### **Ausführungsbeispiel 2:**

Eine Legierung B der folgenden Zusammensetzung:

6,0 Masse-% Silizium  
12,5 Masse-% Magnesium  
2,1 Masse-% Kupfer  
0,2 Masse-% Eisen  
50 ppm Beryllium  
1,0 Gew.-% Magnesiumphosphat  
Rest Aluminium

wird hergestellt, indem die einzelnen Elemente nach den üblichen Verfahren legiert und mittels Stranggießen zu einem zylindrischen Block vergossen werden. Das resultierende Vormaterial wird auf 400 bis 500°C vorgewärmt und durch Strangpressen 10-fach umgeformt und anschließend gehärtet. Dazu wird eine Wärmebehandlung, umfassend Lösungsglühen bei 500°C für 2 Stunden, Abschrecken in Wasser und 10 Stunden Anlassen bei 210°C durchgeführt.

Beryllium wird zugegeben, um die Oxidationsneigung der Schmelze zu mindern, Magnesiumphosphat dient der Kornfeinung des primär erstarrenden Magnesiumsilizids. Eisen wurde als Verunreinigung analysiert.

**Ausführungsbeispiel 3:**

Eine Legierung C der folgenden Zusammensetzung:

12,9 Masse-% Silizium

25,1 Masse-% Magnesium

1,9 Masse-% Kupfer

0,15 Masse-% Eisen

50 ppm Beryllium

0,9 Gew.-% Magnesiumphosphat

Rest Aluminium

wird hergestellt, indem die einzelnen Elemente nach den üblichen Verfahren legiert und mittels Stranggießen zu einem zylindrischen Block vergossen werden. Das resultierende Vormaterial wird auf 400 bis 500°C vorgewärmt und durch Strangpressen 10-fach umgeformt und anschließend gehärtet. Dazu wird eine Wärmebehandlung, umfassend Lösungsglühen bei 500°C für 2 Stunden, Abschrecken in Wasser und 10 Stunden Anlassen bei 210°C durchgeführt.

Beryllium wird zugegeben, um die Oxidationsneigung der Schmelze zu mindern, Magnesiumphosphat dient der Kornfeinung des primär erstarrenden Magnesiumsilizids. Eisen wurde als Verunreinigung analysiert.

Der fertige Werkstoff zeigt die folgenden Eigenschaften:

	Leg. A	Leg. B	Leg. C	2618	AlSi12Cu6MgTiZrV
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	2,50	2,60	2,46	2,77	2,75
Therm. Ausdehnungs- koeffizient [1/K]	$23 \times 10^{-6}$	$23,5 \times 10^{-6}$	$22,5 \times 10^{-6}$	$24 \times 10^{-6}$	./.
E-Modul [GPa]	79,3	78	82	72	./.

Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	390	390	390	420	270
Dehngrenze [N/mm <sup>2</sup> ]	335	335	335	350	235
Bruchdehnung [%]	2,4	1,5	1,1	7,0	./.
Ermüdungs- festigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]					
Raumtemperatur	255	255	250	200	131
200°C	140	135	135	115	97
250°C	100	100	100	95	76

Der erfindungsgemäße Werkstoff zeichnet sich gegenüber dem britischen Aluminium-Standard 2618 durch eine niedrigere Dichte und einem erhöhten E-Modul aus. Die erzielten statischen Festigkeitseigenschaften reichen an die hochfeste Knetlegierung 2618 heran. Die ermittelte Ermüdungsfestigkeit übertrifft die mit der Knetlegierung 2618 erzielten Werte deutlich. Gegenüber der Gusslegierung aus der US 6 419 769 A ist der erfindungsgemäße Werkstoff sowohl bei statischer als auch bei dynamischer Prüfung überlegen. Er eignet sich aufgrund dieser Eigenschaftskombination in besonderer Weise zur Herstellung von Kolben für Verbrennungsmotoren.

### Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung eines Werkstoffs, wobei eine Aluminium-Basislegierung mit einem Gehalt an 5,5 bis 13,0 Masse-% Silizium und einem Gehalt an Magnesium gemäß der Formel
$$\text{Mg [Masse-\%]} = 1,73 \times \text{Si [Masse-\%]} + m$$
mit  $m = 1,5$  bis 6,0 Masse-% Magnesium sowie mit einem Kupfergehalt zwischen 1,0 und 4,0 Masse-% hergestellt wird, die Basislegierung danach zumindest einmal warmumgeformt, sowie nachfolgend einer Wärmebehandlung bestehend aus Lösungsglühen, Abschrecken und Warmauslagern unterzogen wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Basislegierung mittels Sprühkompaktieren hergestellt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Basislegierung mittels dem Verfahren des Stranggießens hergestellt wird.
4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Basislegierung mittels dem Verfahren des Kokillengießens hergestellt wird.
5. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Basislegierung zum Zwecke der Kornfeinung des sich bildenden Primär-Magnesiumsilizids 0,5 – 1,5 Gew. % Magnesiumphosphat enthält.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Basislegierung mittels Strangpressen, Warmwalzen oder Schmieden warmumgeformt wird.



7. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass das Warmumformen mit einem Umformgrad größer als 5-fach durchgeführt wird.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass 1,5 bis 3,0 Masse-% Kupfer zulegiert werden.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das verwendete Aluminium nicht mehr als jeweils 1 Masse-% Fremdelemente enthält.
10. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Werkstoff 2h bei 500°C durchgewärmt, in Wasser abgeschreckt und anschließend 10 h bei 210°C angelassen wird.
11. Werkstoff auf Basis einer Aluminium-Legierung, erhältlich durch ein Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 10.
12. Verwendung des Werkstoffs nach Anspruch 11 zur Herstellung von Bauteilen.
13. Bauteil nach Anspruch 12, nämlich Kolben für Verbrennungsmotoren.